

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.5:519.6

А. А. Андрижиевский, доктор технических наук, профессор (БГТУ);

А. Г. Трифонов, доктор технических наук, профессор (БГТУ);

Л. С. Кулик, магистрант (БГТУ)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА И ОСАЖДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ХАРАКТЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭС

В данной статье приведены разработанные модели расчета динамики распространения выбросов загрязняющих веществ в аварийных ситуациях. Произведена оценка механизмов осаждения радиоактивных веществ на характерных поверхностях территории АЭС в аварийных ситуациях. По результатам численного моделирования определены зоны преимущественного осаждения примесных аэрозолей на характерных поверхностях инфраструктуры АЭС.

The developed model of calculation of dynamics of distribution of waste substance emission in emergency situations is presented in this article. An assessment of the mechanisms of the deposition of radioactive substances on the characteristic surfaces of the NPP in emergency situations is made. The areas of preferential deposition of waste aerosols on the characteristic surfaces infrastructure for NPP are defined as a result of numerical simulation.

Введение. Целью работы являлся анализ процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц на различные типы поверхностей в аварийных ситуациях на территории площадки АЭС. Оценка уровней возможной радиационной опасности является одной из важнейших задач, которые необходимо решать на всех этапах жизненного цикла АЭС. Основным требованием является принцип неперевышения предельно допустимых величин радиоактивных выбросов АЭС и обуславливаемых ими доз облучения персонала. Безопасность АЭС обеспечивается за счет анализа уровней возможного радиоактивного загрязнения и принятия научно обоснованных мер по защите персонала АЭС. Для идентификации опасности и характеристики экспозиции выбросов АЭС необходимо создать карту преимущественного загрязнения площадки АЭС на основе компьютерного моделирования переноса примесных веществ в аварийных ситуациях.

Постановка задачи исследования. В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан модельный аналог площадки АЭС (рис. 1).

Перенос примеси в атмосфере и осаждение ее на поверхность земли представляет собой сложную и многогранную задачу. Распространение радиоактивного облака подвержено влиянию различных факторов, в числе которых метеорологические условия района, рельеф поверхности и т. д.

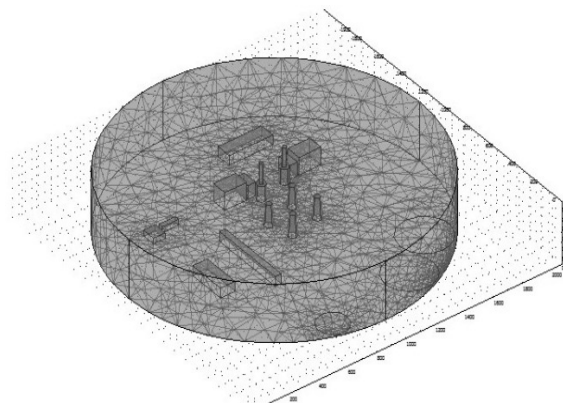


Рис. 1. Модельный аналог и расчетная сетка площадки АЭС (геометрические параметры – 2000×2000×300 м)

Система уравнений сохранения для отдельных фаз положена в основу моделирования потока и транспортируемой дисперсной примеси, которые решаются численно совместно с уравнениями, описывающими процессы межфазного переноса. Данная система уравнений сохранения дополняется соответствующими наборами начальных и граничных условий, а также интегральными параметрами работы техногенных источников.

Для моделирования динамики несущего потока принята следующая система уравнений сохранения [2]:

$$\frac{\partial \rho W_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} + W_j \frac{\partial W_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_E \frac{\partial W_i}{\partial x_j} - \overline{W_i' W_j'} \right) + g_i \delta_{ij}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + W_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_E \frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

$$\text{где } \overline{W_i' W_j'} = -\nu_E \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} K_j, \quad W_i, W_j -$$

компоненты скорости транспортного потока вдоль осей x_i, x_j (в данной модели $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$; x_1, x_2, x_3 – пространственные координаты); t – время; P, T – давление, температура; ρ – плотность; g – ускорение силы тяжести; ν, a – коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности; K – турбулентная кинетическая энергия согласно « k - ϵ » модели турбулентности. Нижний символ E – эффективное значение.

Для описания процесса переноса диспергированных радионуклидов в потоке исходная система уравнения сохранения (1)–(3) дополняется уравнениями движения и сохранения аэрозольных частиц [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{p,n}}{\partial t} + (W_{p,n})_i \frac{\partial N_{p,n}}{\partial x_j} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{p,n} \frac{\partial N_{p,n}}{\partial x_j} \right) + J_{p,n}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$N_{p,\Sigma} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} [\tilde{N}_p(L_n)] N_{p,n} d(L_n), \quad (5)$$

где $N_{p,n}$ – объемная концентрация частиц размером L_n ; $(W_{p,n})_i$ – компонента скорости частиц размером L_n ; $D_{p,n}$ – коэффициент диффузии частиц размером L_n ; $[\tilde{N}_p(L_n)]$ – функция распределения частиц по размерам L_n ; $J_{p,n}$ – источник частиц размером L_n .

Представленные выше уравнения дополняются начальными и граничными условиями с учетом генплана АЭС, включая метеорологические данные и топографию подстилающей поверхности. На территории площадки АЭС можно выделить три основных типа поверхности. При этом можно принять, что в аварийных ситуациях структура поверхности влияет в основном на динамику распространения аварийных выбросов.

При различных категориях аварий выбираются преимущественно йод и цезий в виде

аэрозольных частиц размером до 1 мм [3]. Ввиду малой концентрации аэрозольных частиц системы уравнений потока (1)–(3) и (4)–(5) решаются независимо друг от друга.

Для численной реализации модельного аналога площадки АЭС использовался метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics.

Открытая водная поверхность. Как показали результаты натурных экспериментальных и расчетных исследований, все аэрозоли, попавшие в пограничный слой ≈ 1 м над поверхностью, осаждаются в водной среде без второго уноса.

Твердая поверхность. Эффективность осаждения аэрозолей определяется структурой потока и свойствами аэрозоля.

Для сравнения различных типов земной поверхности по интенсивности осаждения и образования поверхностной концентрации радиоактивных веществ можно использовать данные по эффективной скорости осаждения v_{oc} . Величина имеет размерность скорости м/с (таблица, [4]). Значения v_{oc} могут быть использованы для определения интенсивности выпадений при известной концентрации продуктов деления в атмосфере по формуле

$$d = q \cdot v_{oc}, \quad (7)$$

где q – концентрация в воздухе, Бк/м³; d – интенсивность выпадений, Бк/(м² · с).

Величины скорости осаждения v_{oc} продуктов деления

Тип подстилающей поверхности	$v_{oc} \cdot 10^2, \text{м}$
Травяной луг	0,25–4,00
Скошенная трава	0,59
Сухая почва	0,33

Экспериментальные данные относятся к аэрозольным частицам размером $\approx 0,2$ мм при турбулентном механизме осаждения.

Поверхность с «шероховатостью». Как следует из анализа данных таблицы, интенсивность осаждения радиоактивных веществ на скошенную траву или газон примерно в два раз выше, чем интенсивность осаждения на сухую твердую поверхность. Для более высокой растительности интенсивность осаждения еще выше. Подобная разбежка в интенсивности осаждения объясняется тем, что покрывающая земную поверхность растительность может иметь различную удельную (на единице земной поверхности) поверхность осаждения и различную степень торможения несущего аэрозольные

частицы воздушного потока. В точных моделях процессов осаждения развитую растительность можно моделировать пористой средой с различной степенью пористости и коэффициентом проницаемости.

Процесс осаждения радиоактивных веществ на характерные поверхности территории АЭС зависит также и от местных гидрометеорологических условий, а именно от влажности, атмосферных осадков, ветров, атмосферных явлений, температурной инверсии.

Климат района промплощадки АЭС умеренно континентальный с достаточно теплым и продолжительным летом и умеренно холодной зимой. Среднегодовая температура воздуха $5,4^{\circ}\text{C}$, абсолютный максимум – плюс 35°C , абсолютный минимум – минус 40°C .

Результаты исследования. Схема вычислительного эксперимента по стандарту тестирования модели представлена на рис. 2 [1]:

- высота здания кубической формы $H = 60$ м;
- ветер $U_0 = 7$ м/с на левой границе расчетной области. Направление ветра слева направо;
- центр куба расположен на расстоянии $3,5H$ от левого края;
- источник приземный на расстоянии $0,25H$ за зданием.

Концентрация выбросов загрязняющих веществ измерялась на линиях L_3L_4 и на оси следа.

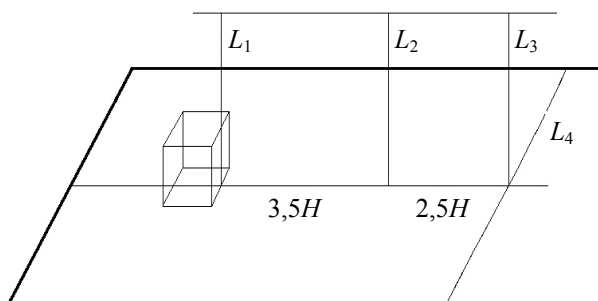


Рис. 2. Схема стандартной процедуры тестирования моделей (обозначения согласно текста)

Расчеты по данной схеме эксперимента с использованием ряда модельных продуктов представлены на рис. 3.

На рис. 4 (аналог рис. 3) представлены данные измерений поперек следа (с учетом наблюдаемого разброса значений – течение вихревое).

Расчеты выполнены с использованием разработанной модели динамики распространения выбросов аэрозольных частиц в аварийных ситуациях. Верификация модели производилась по данным ИБРАЭ РАН (Россия).

Проведенный сравнительный анализ различных модельных продуктов подтверждает достоверность разработанного программного

модуля, на основании чего можно сделать вывод о возможности его использования для обоснования безопасности строящейся в Республике Беларусь АЭС. При этом следует отметить, что отличительной особенностью представленной в работе модели является учет не только динамических, но и тепловых параметров выбросов примесных частиц из технологических элементов АЭС, что может заметно повлиять на факел выброса, в особенности в аварийных ситуациях.

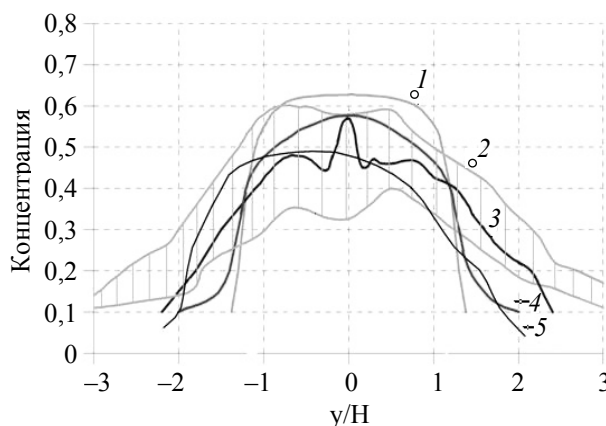


Рис. 3. Относительная концентрация выбросов загрязняющих веществ по линии L_4 , приведенная к концентрации тестового источника (рис. 2): 1 – модель типа RANS Ливерморской лаборатории; 2 – диапазон измеренных значений концентрации (вихревое меандрирующее течение); 3 – модель типа LES Ливерморской лаборатории; 4 – FLUENT; 5 – расчеты ИБРАЭ РАН

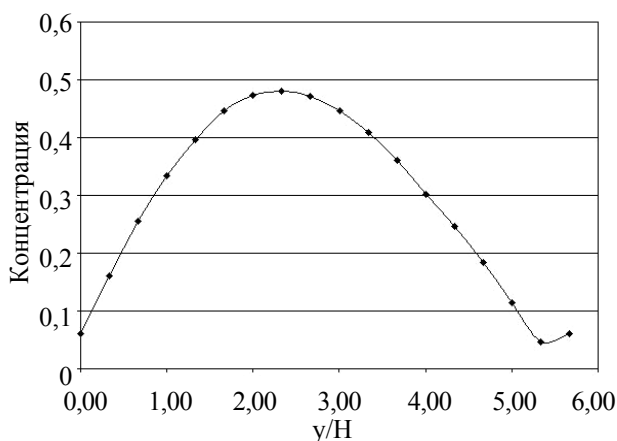


Рис. 4. Концентрация выбросов загрязняющих веществ (расчеты по методике данной работы согласно схеме на рис. 3)

В рамках модельных вычислительных экспериментов были проведены тестовые расчеты по анализу динамики распространения радионуклидов в аварийных ситуациях с выбросом из вентиляционной трубы. Аварийный выброс представлял собой шлейф по ходу ветра.

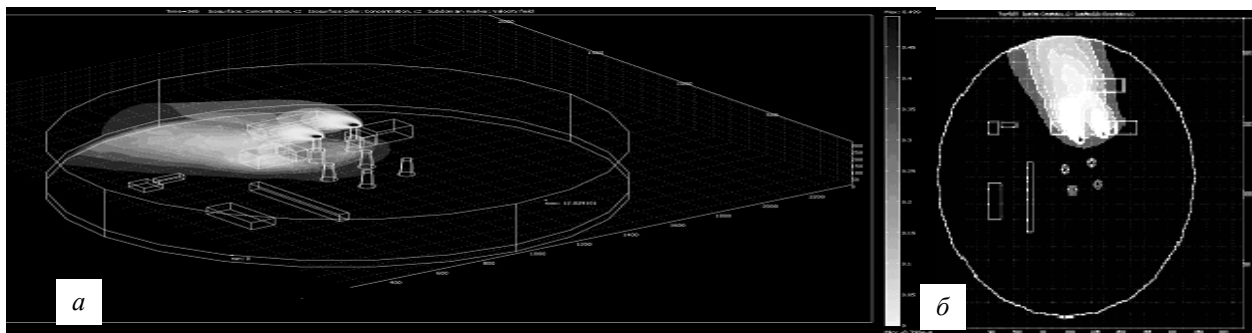


Рис. 5. Распределение концентраций аэрозольных частиц в инфраструктуре АЭС (геометрические параметры согласно рис. 1):

а – пространственное распределение концентраций в задаче на установление; *б* – проекция поля концентраций на подстилающую поверхность (диапазон изменения концентраций от $8 \cdot 10^{-4}$ до 0,5)

Расчеты проводились для характерного генплана АЭС и летних условий: температура окружающей среды составляла 20°C , максимальная скорость ветрового потока – 10 м/с. Скорость осаждения аэрозольных частиц в несущем потоке на высоте 10 м составляла 0,1 м/с, что соответствует частицам диаметром 30 мкм и плотностью 1000 кг/м^3 [3]. В расчетах были выделены два основных механизма осаждения: гравитационное и диффузионное. Данные механизмы осаждения примесных веществ можно учесть в общей системе уравнения сохранения, при допущении наличия проницаемой подстилающей поверхности.

Результаты расчета пространственных полей концентраций и отложения примесных веществ на подстилающей поверхности на территории АЭС приведены на рис. 5. Из вида полей концентраций на рис. 5, в частности, следует, что учет тепловых характеристик выброса, т. е. температурной конвекции, дает более реальные профили концентраций. А именно наличие осадений не только с подветренной, но и с противоположной стороны источника.

Иллюстрацией влияния термоконвекции, а также диспергированной капельной влаги из градирен на факел выброса примесных частиц из трубы промвентиляции может служить рис. 6.

На рис. 6 приведены результаты вычислительных экспериментов по определению максимальной концентрации аэрозолей на подстилающей поверхности при выбросе из вентиляционной трубы с учетом градирни при их различном расположении относительно ветрового потока. В рамках вычислительных экспериментов рассмотрены следующие ситуации: *ситуация № 1* – выброс только из трубы промвентиляции высотой 100 м; *ситуация № 2* – совместный выброс из трубы промвентиляции и «холодный» выброс капельной влаги из градирни высотой 170 м при ее расположении

за (по ходу ветрового потока) системой промвентиляции; *ситуация № 3* – обратная по отношению к *ситуации № 2*; *ситуация № 4* – *ситуация № 2* + «горячий» выброс из градирни; *ситуация № 5* – обратная по отношению к *ситуации № 4*.

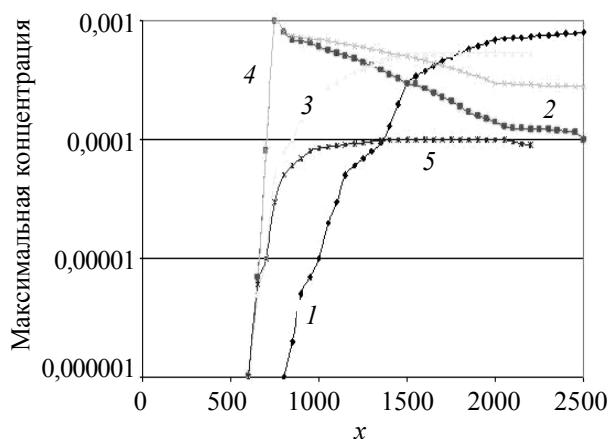


Рис. 6. Максимальная концентрация на подстилающей поверхности при выбросе из вентиляционной трубы с учетом градирни: 1 – ситуация № 1 (согласно тексту); 2 – ситуация № 2; 3 – ситуация № 3; 4 – ситуация № 4; 5 – ситуация № 5 (диапазон концентраций от 10^{-7} до 10^{-4} кг/м^3 , диапазон изменения расстояний от источника от 0 до 2500 м)

Концентрация аэрозолей в местах приповерхностного скопления радиоактивных аэрозолей составляет величину около 0,001–0,100% от концентрации в начальной точке выброса (на выходе из вентиляционной трубы). Вторичное загрязнение атмосферы от земной поверхности может происходить из-за повторного пылеобразования в воздухе и ветрового переноса выпавших радионуклидов.

Подъем радионуклидов с земной поверхности не зависит от их физико-химических свойств радионуклидов, а обусловлен лишь

свойствами носителей активности – дисперсными частицами. Однако измерения показали [4], что коэффициенты ветрового подъема радиоактивных продуктов являются незначительными.

Заключение. В рамках среды разработки вычислительных программ COMSOL создан компьютерный модуль расчета процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц на характерных поверхностях инфраструктуры АЭС.

Произведен анализ процесса осаждения аэрозольных частиц на различные типы поверхностей в аварийных ситуациях на территории площадки АЭС. Получено, что зона преимущественного осаждения радиоактивных аэрозолей зависит от свойств аэрозольных частиц, внешних метеоусловий, состояния приземной поверхности, инфраструктуры территории площадки АЭС, а также протекающих на ней тепловых потоков из градирни.

Литература

1. Лайтман Д. Л., Левитин И. Л. Формирование пароводяного облака в окрестности градирни и его влияние на интенсивность турбулентной диффузии // Труды гидрометеорологического института. Л.: ЛГМИ, 1977. Вып. 62. С. 54–64.
2. Pugliese, S. Jaeger, M. Occelli, R. Finite element modelling of plume dispersion in the lower part of the atmosphere // Air Pollution: Monitoring, Simulation and Control (ed. B. Caussade, H. Power, C.A. Brebbia) Comp. Mech. Pub. Southampton-Boston, 1996. P. 99–108.
3. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов [и др.]. М.: Химия, 1981. 392 с.
4. Романов Г. Н., Уханова В. А. Некоторые количественные характеристики непосредственного загрязнения надземной части растений глобальными радиоактивными выпадениями. М.: Атомиздат, 1969. 11 с.

Поступила 05.03.2014